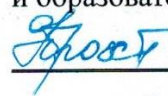


Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
и образовательным инновациям



О.Г. Прохоренко

« 29 » июня 2023 г.

Регистрационный № УД-12454 уч.



МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности:**

1-31 03 01 Математика (по направлениям)

Направление специальности

1-31 03 01-01 Математика (научно-производственная деятельность)

2023 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 03 01-2021, типового учебного плана № G 31-1-011/пр-тип. от 31.03.2021 и учебных планов: № G31-1-003/уч. от 25.05.2021, № G31-1-061/уч. ин. от 31.05.2021, № G31-1-207/уч. от 22.03.2022, № G31-1-243/уч. ин. от 27.05.2022.

СОСТАВИТЕЛИ: Константин Владимирович Лыков, профессор кафедры функционального анализа и аналитической экономики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Пыжкова Ольга Николаевна, заведующий кафедрой высшей математики Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет», кандидат физико-математических наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

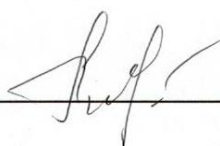
Кафедрой функционального анализа и аналитической экономики

(протокол № _13_ от __22.05.2023);

Научно-методическим Советом БГУ

(протокол № 9 от 29.06.2023)

Заведующий кафедрой



А.В. Лебедев

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цель учебной дисциплины «Математические основы квантовых вычислений» – подготовка специалистов, способных использовать фундаментальные математические результаты и методы для проведения прикладных исследований в области квантового компьютеринга и квантовой информации, а также углубление теоретических познаний в функциональном анализе, теории вероятностей и теории алгоритмов.

Задачи учебной дисциплины:

1. Ознакомление студентов с основными идеями и принципами квантовых вычислений.
2. Ознакомление студентов с классическими квантовыми алгоритмами.
3. Формирование у студентов понимания взаимосвязей между различными математическими, естественно-научными и техническими дисциплинами.
4. Формирование у студентов навыков алгоритмического мышления.
5. Повышение их математической культуры и навыков использования математики в прикладных задачах.

Место учебной дисциплины. В системе подготовки специалиста с высшим образованием учебная дисциплина относится к модулю «Дисциплины специализации» компонента учреждения высшего образования.

Учебная программа составлена с учетом межпредметных **связей** и программ по дисциплинам: «Функциональный анализ», «Теория вероятностей и математическая статистика», «Алгебра и теория чисел», «Физика»

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Математические основы квантовых вычислений» должно обеспечить формирование следующих компетенций:

универсальные компетенции:

УК-1. Владеть основами исследовательской деятельности, осуществлять поиск, анализ и синтез информации;

базовые профессиональные компетенции:

БПК-2. Использовать понятия и методы вещественного, комплексного и функционального анализа и применять их для изучения моделей окружающего мира.

БПК-5. Применять основные алгебраические и геометрические понятия, конструкции и методы при решении теоретических и прикладных математических задач

специализированные компетенции:

СК-2. Применять ключевые методы защиты информационных систем при реализации криптоприложений

знать:

- основные понятия квантовой информатики;
- наиболее известные квантовые алгоритмы;

уметь:

- оценить сложность классического и квантового алгоритма;
- представить квантовый алгоритм в виде квантовой схемы;

владеть:

- терминологией квантовых вычислений и основными методами построения квантовых алгоритмов.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 6 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Математические основы квантовых вычислений» отведено:

– в очной форме получения высшего образования: 120 часов, в том числе 68 аудиторных часов, из них: лекции – 62 часа, управляемая самостоятельная работа – 6 часов. Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма промежуточной аттестации – зачет.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ КВАНТОВОЙ ИНФОРМАТИКИ

Тема 1.1. *Введение*. Краткая история квантовых алгоритмов. Обзор существующих идей построения квантовых компьютеров. Экспериментальные образцы. Адиабатический квантовый компьютер.

Тема 1.2. *Базовые понятия квантовой механики*. Двухщелевой эксперимент. Квантовое состояние и квантовое измерение. Квантовая суперпозиция. Физика информации.

Тема 1.3. *Квантовые биты*. Математическое определение квантового бита (кубита). Реализация квантового бита. Спин. Поляризация фотона.

Тема 1.4. *Составные системы*. Квантовое запутывание. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена. Неравенства Белла. Многокомпонентное запутывание.

Тема 1.5. *Операторы*. Унитарные операторы. Преобразования квантовой системы. Понятие о квантовом венти́ле. Функции от операторов. Операторная экспонента. Коммутатор и антикоммутатор. След оператора. Группы операторов.

Тема 1.6. *Алгоритм Дойча*. Постановка задачи Дойча. Разбор первого квантового алгоритма – алгоритма Дойча. Разбор причин ускорения вычислений на примере алгоритма Дойча.

Раздел 2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ АЛГОРИТМОВ.

Тема 2.1. *Формализация понятия алгоритм*. Машина Тьюринга. Вычислимые функции. Тезис Чёрча-Тьюринга. Схемная модель вычислений. Булевы функции и булевы схемы.

Тема 2.2. *Сложность алгоритмов*. Вычислительные ресурсы: время, память, энергия. Полиномиальная и суперполиномиальная сложность. Примеры классических алгоритмов и оценка их сложности. Вероятностная машина Тьюринга. Строгий тезис Чёрча-Тьюринга. Классы сложности P и NP. Примеры задач классов P и NP. Примеры сводимости одних задач к другим. Сведение задачи о гамильтоновом цикле (HC) к задаче коммивояжера (TSP). Сведение задачи коммивояжера к задаче квадратичной неограниченной бинарной оптимизации (CUBO). Двумерная модель Изинга и решение задачи CUBO на адиабатическом квантовом компьютере.

Раздел 3. КВАНТОВЫЕ ВЕНТИЛИ И КВАНТОВЫЕ СХЕМЫ.

Тема 3.1. *Математическая модель системы кубитов*. Конечномерное гильбертово пространство. Обозначения Дирака. Разложение Шмидта. Тензорное произведение. Произведение Кронекера. Стандартные базисы. Скалярное произведение и процедура измерения. Вычислительный базис. Вероятностный смысл коэффициентов разложения по вычислительному базису. Общее понятие о волновой функции, ее эволюции и проблеме квантового измерения.

Тема 3.2. *Однокубитовые унитарные элементы*. Элемент NOT. Матрицы Паули и их свойства. Поворотные элементы. Описание всех однокубитовых элементов.

Тема 3.3. *Управляемые квантовые элементы*. Управляющий и управляемый кубит. Элемент CNOT. Элемент Тоффоли. Элемент Фредкина.

Тема 3.4. *Обратимые вычисления.* Понятие об обратимости вычислений. Физический смысл необратимости: диссипация и затраты энергии. Принцип Ландауэра. Примеры обратимых и необратимых элементов.

Тема 3.5. *Квантовые схемы.* Представление квантовых элементов и квантовых алгоритмов в виде квантовой схемы. Процедура измерения в квантовой схеме.

Тема 3.6. *Универсальные наборы квантовых элементов.* Аппроксимация унитарных операторов. Понятие об универсальном наборе элементов. Теорема Соловея-Китаева.

Раздел 4. КЛАССИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ АЛГОРИТМЫ.

Тема 4.1. *Алгоритм Дойча-Джозы.* Сбалансированные функция. Квантовый оракул. Преобразование Адамара. Квантовая схема алгоритма Дойча-Джозы.

Тема 4.2. *Алгоритм Саймона.* Постановка задачи Саймона. Экспоненциальная сложность задачи Саймона на классическом компьютере. Решение задачи Саймона на квантовом компьютере за полиномиальное время. Обобщенная задача Саймона и ее решение.

Тема 4.3. *Квантовое преобразование Фурье.* Кодирование информации с помощью квантовой фазы. Использование элементов Адамара для кодирования и декодирования фазы. Задача Бернштейна-Вазирани и ее решение. Задача оценки квантовой фазы. Оператор поворота фазы. Квантовое преобразование Фурье. Анализ погрешности при оценке квантовой фазы. Нахождение периода периодического состояния. Задача оценки собственного значения и алгоритм ее решения, использующий квантовое преобразование Фурье.

Тема 4.4. *Алгоритм Шора.* О науке криптографии и ее задачах. Асимметричное шифрование и алгоритм RSA. Понятие об односторонней функции. Сложность задачи факторизации натурального числа. Задача нахождения порядка и сведение к ней задачи факторизации. Нахождение порядка по Шору. Нахождение порядка методом оценки собственного значения.

Тема 4.5. *Дискретное логарифмирование.* Задача дискретного логарифмирования, ее сложность и применение в криптографии. Квантовый алгоритм нахождения дискретного логарифма. Сравнение сложности квантового и лучшего классического алгоритмов дискретного логарифмирования.

Тема 4.6. *Алгоритм Гровера.* Квантовый алгоритм поиска Гровера. Обобщения алгоритма Гровера. Усиление амплитуды. Квантовая оценка амплитуды. Квантовое перечисление. Ускорение решения NP-полных задач. Квантовый поиск в неструктурированной базе данных.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Очная форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы,	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		лекции	практические занятия	семинарские занятия	лабораторные занятия	иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	6 семестр							
1.	Раздел 1. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ КВАНТОВОЙ ИНФОРМАТИКИ.	14	0	0	0	0	0	
1.1.	<i>Тема 1.1. Введение</i>	2	0	0	0	0	0	
1.1.1	Краткая история квантовых алгоритмов. Обзор существующих идей построения квантовых компьютеров. Экспериментальные образцы. Адиабатический квантовый компьютер.							
1.2.	<i>Тема 1.2. Базовые понятия квантовой механики.</i>	2	0	0	0	0	0	
1.2.1	Двухщелевой эксперимент. Квантовое состояние и квантовое измерение. Квантовая суперпозиция. Физика информации.							
1.3.	<i>Тема 1.3. Квантовые биты.</i>	2	0	0	0	0	0	
1.3.1	Математическое определение квантового бита (кубита). Реализация квантового бита. Спин. Поляризация фотона.							
1.4	<i>Тема 1.4. Составные системы.</i>	2	0					
1.4.1	Квантовое запутывание. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена. Неравенства Белла. Многокомпонентное запутывание.							
1.5	<i>Тема 1.5. Операторы.</i>	4	0					Опрос
1.5.1	Унитарные операторы. Преобразования квантовой системы. Понятие о квантовом вентиле.							

1.5.2	Функции от операторов. Операторная экспонента. Коммутатор и антикоммутатор. След оператора. Группы операторов.							
1.6	Тема 1.6. <i>Алгоритм Дойча.</i>	2	0					
1.6.1	Постановка задачи Дойча. Разбор первого квантового алгоритма — алгоритма Дойча. Разбор причин ускорения вычислений на примере алгоритма Дойча.							
2.	Раздел 2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ АЛГОРИТМОВ	10	0	0	0	0	2	
2.1.	Тема 2.1. <i>Формализация понятия алгоритм.</i>	4	0	0	0	0	2	Собеседование
2.1.1	Машина Тьюринга. Вычислимые функции. Тезис Чёрча-Тьюринга. Схемная модель вычислений. Булевы функции и булевы схемы.							
2.2.	Тема 2.2. <i>Сложность алгоритмов.</i>	6	0	0	0	0	0	Контрольная работа
2.2.1	Вычислительные ресурсы: время, память, энергия. Полиномиальная и суперполиномиальная сложность. Примеры классических алгоритмов и оценка их сложности.							
2.2.2	Вероятностная машина Тьюринга. Строгий тезис Чёрча-Тьюринга. Классы сложности P и NP. Примеры задач классов P и NP.							
2.2.3	Примеры сводимости одних задач к другим. Сведение задачи о гамильтоновом цикле (HC) к задаче коммивояжера (TSP). Сведение задачи коммивояжера к задаче квадратичной неограниченной бинарной оптимизации (CUBO). Двумерная модель Изинга и решение задачи CUBO на адиабатическом квантовом компьютере.							
3.	Раздел 3. КВАНТОВЫЕ ВЕНТИЛИ И КВАНТОВЫЕ СХЕМЫ	14	0	0	0	0	2	
3.1	Тема 3.1. <i>Математическая модель системы кубитов.</i>	4	0	0	0	0	2	Контрольная работа
3.1.1	Конечномерное гильбертово пространство. Обозначения Дирака. Разложение Шмидта. Тензорное произведение. Произведение Кронекера. Стандартные базисы. Скалярное произведение и процедура измерения.							
3.1.2	Вычислительный базис. Вероятностный смысл коэффициентов							

	разложения по вычислительному базису. Общее понятие о волновой функции, ее эволюции и проблеме квантового измерения.							
3.2.	Тема 3.2. Однокубитовые унитарные элементы.	2	0	0	0	0		Опрос
3.2.1	Элемент NOT. Матрицы Паули и их свойства. Поворотные элементы. Описание всех однокубитовых элементов.							
3.3.	Тема 3.3. Управляемые квантовые элементы.	2	0	0	0	0	0	Опрос
3.3.1	Управляющий и управляемый кубит. Элемент CNOT. Элемент Тоффоли. Элемент Фредкина.							
3.4.	Тема 3.4. Обратимые вычисления.	2	0	0	0	0		
3.4.1	Понятие об обратимости вычислений. Физический смысл необратимости: диссипация и затраты энергии. Принцип Ландауэра. Примеры обратимых и необратимых элементов.							
3.5.	Тема 3.5. Квантовые схемы.	2	0					Контрольная работа
3.5.1	Представление квантовых элементов и квантовых алгоритмов в виде квантовой схемы. Процедура измерения в квантовой схеме.							
3.6.	Тема 3.6. Универсальные наборы квантовых элементов.	2						
3.6.1	Аппроксимация унитарных операторов. Понятие об универсальном наборе элементов. Теорема Соловья-Китаева.							
4.	Раздел 4. КЛАССИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ АЛГОРИТМЫ	24	0	0	0	0	2	
4.1.	Тема 4.1. Алгоритм Дойча-Джозы.	2	0				0	Опрос
4.1.1	Сбалансированные функции. Квантовый оракул. Преобразование Адамара. Квантовая схема алгоритма Дойча-Джозы.							
4.2.	Тема 4.2. Алгоритм Саймона.	2	0					
4.2.1	Постановка задачи Саймона. Экспоненциальная сложность задачи Саймона на классическом компьютере. Решение задачи Саймона на квантовом компьютере за полиномиальное время. Обобщенная задача Саймона и ее решение.							
4.3	Тема 4.3. Квантовое преобразование Фурье.	8	0					Контрольная работа
4.3.1	Кодирование информации с помощью квантовой фазы.							

	Использование элементов Адамара для кодирования и декодирования фазы. Задача Бернштейна-Вазирани и ее решение.							
4.3.2	Задача оценки квантовой фазы. Оператор поворота фазы. Квантовое преобразование Фурье.							
4.3.3	Анализ погрешности при оценке квантовой фазы.							
4.3.4	Нахождение периода периодического состояния.							
4.3.5	Задача оценки собственного значения и алгоритм ее решения, использующий квантовое преобразование Фурье.							
4.4	Тема 4.4. Алгоритм Шора.	4					2	Собеседование
4.4.1	О науке криптографии и ее задачах. Асимметричное шифрование и алгоритм RSA. Понятие об односторонней функции. Сложность задачи факторизации натурального числа. Задача нахождения порядка и сведение к ней задачи факторизации.							
4.4.2	Нахождение порядка по Шору. Нахождение порядка методом оценки собственного значения.							
4.5	Тема 4.5. Дискретное логарифмирование.	2						
4.5.1	Задача дискретного логарифмирования, ее сложность и применение в криптографии. Квантовый алгоритм нахождения дискретного логарифма. Сравнение сложности квантового и лучшего классического алгоритмов дискретного логарифмирования.							
4.6.	Тема 4.6. Алгоритм Гровера.	6						Опрос
4.6.1	Квантовый алгоритм поиска Гровера.							
4.6.2	Обобщения алгоритма Гровера. Усиление амплитуды. Квантовая оценка амплитуды. Квантовое перечисление.							
4.6.3	Ускорение решения NP-полных задач.							
4.6.4	Квантовый поиск в неструктурированной базе данных.							
	ВСЕГО	62	0	0	0	0	6	

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. Москва: МИР, 2006. - 824 с.
2. Борзунов С.В., Кургалин С.Д. Квантовые вычисления. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022. - 144 с.
3. Кайе Ф., Лафлам Р., Моска М. Введение в квантовые вычисления. Москва -Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. - 360 с.
4. Прескилл Дж. Квантовая информация и квантовые вычисления. — Ижевск: РХД, 2008—2011. — 464+312 с.
5. Стин Э. Квантовые вычисления. - Ижевск: РХД, 2019. - 112 с.
6. Стиб В.-Х., Харди Й. Задачи и их решения в квантовых вычислениях и квантовой теории информации. - Москва-Ижевск: РХД, 2007. - 296 с.
7. Химено-Сеговиа М., Хэрриган Н. и Джонстон Э. Программирование квантовых компьютеров. Базовые алгоритмы и примеры кода. Санкт-Петербург: Издательский дом «Питер», 2021 - 336 с.
8. <https://quantumalgorithmzoo.org/> (Зоопарк квантовых алгоритмов)

Перечень дополнительной литературы

1. Сысоев С.С. Введение в квантовые вычисления. Квантовые алгоритмы. СПб.: Изд-во С.-Петербург. Ун-та, 2019. — 144 с.
2. Перри Р. Элементарное введение в квантовые вычисления. Долгопрудный: Интеллект, 2018. - 208 с.
3. Сатор Р. Танец с кубитами. Как на самом деле работают квантовые вычисления. Санкт-Петербург: Питер, 2022- 512 с.
4. Шарки К.Л., Чанс А. Квантовая химия и квантовые вычисления с примерами на Python. -Москва: ДМК Пресс, 2023. - 282 с.
5. Силва В. Разработка с использованием квантовых компьютеров. Санкт-Петербург: Издательский дом «Питер», 2020 — 352 с.
6. Кайзер С., Гранад К. Изучаем квантовые вычисления на Python и Q# — М.: ДМК Пресс, 2021. – 430 с.
7. Китаев А.Ю., Шень А., Вялый М.Н. Классические и квантовые вычисления. М.: МЦНМО, 1999. - 192 с.
8. Торгаев С.Н., Шульга И.Д., Юрченко Е.А., Громов М.Л. Основы квантовых вычислений : учебное пособие. – Томск : STT, 2020. – 100 с.
9. Ожигов Ю.И. Конструктивная физика. — Ижевск: РХД, 2010. — 424 с.
10. Ожигов Ю.И. Конструктивная физика 2: Квантовый компьютер и управление сложными системами. — Ижевск: РХД, 2013. — 186 с.
11. Дойч Д. Структура реальности. — Ижевск: РХД, 2001. — 400 с.
12. Манин Ю. И. Вычислимое и невычислимое. — : Сов. радио, 1980. — С. 15. — 128 с.

13. Валиев К.А., Кокин А. А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. — Ижевск: РХД, 2004. — 320 с.
14. Барроу Дж., Дэвис П., Харпер Ч. Наука и предельная реальность: квантовая теория, космология и сложность. — Ижевск: РХД, 2013. — 664 с.
15. Менский М.Б. Человек и квантовый мир. — Фрязино: «Век 2, 2005. — С. 224.
16. Макконнелл Дж. Основы современных алгоритмов. - Москва: Техносфера, 2004. - 368 с.
17. Скиена С. Алгоритмы. Руководство по разработке. - Санкт-Петербург: «БХВ-Санкт-Петербург», 2020. – 720 с.
18. Килин С. Я. Квантовая информация // УФН. — 1999. — Т. 169. — С. 507—527.
19. Квантовая криптография: идеи и практика / под ред. С. Я. Килина, Д. Б. Хорошко, А. П. Низовцева. — Минск: 2008.
20. Берман Г.П., Дулен Г.Д., Майньери Р., Цифринович В.И. Введение в квантовые компьютеры. - Москва-Ижевск: РХД, 2004. -188 с.
21. Гринштейн Дж., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики, Долгопрудный: Интеллект, 2012. - 432 с.
22. Холево А.С. Вероятностные и статистические аспекты квантовой теории. М.: МЦНМО, 2020. - 364 с.
23. Холево А.С. Квантовые системы, каналы, информация. М.: МЦНМО, 2014. - 328 с.
24. Прасолов В.В. Задачи и теоремы линейной алгебры. М.: МЦНМО, 2015. - 576 с.
25. Глазман И.М., Любич Ю.И. Конечномерный линейный анализ. М.: Наука, 1969. - 476 с.
26. Woody L.S. Essential mathematics for quantum computing. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2022 -252 p.
27. Gupta V.P., Mandayam P., Sunder V.S. The functional analysis of quantum information theory. Springer, 2015. - 148 p.
28. Lipton R.J., Regan K.W. Introduction to quantum algorithms via linear algebra. Massachusetts Institut of Technology, 2021. -266 p.
29. Baaquie B.E., Kwek L.-C. Quantum Computers. Theory and Algorithms. Springer, 2023. - 296 p.
30. Combarro E.F., González-Castillo S. A Practical Guide to Quantum Machine Learning and Quantum Optimization. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2023 — 680 p.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой отметки

Объектом диагностики компетенций студентов являются знания, умения, полученные ими в результате изучения учебной дисциплины. Выявление учебных достижений студентов осуществляется с помощью мероприятий текущего контроля и промежуточной аттестации.

Для диагностики компетенций могут использоваться следующие средства текущего контроля: опрос, собеседования; коллоквиумы; тесты; контрольные опросы; контрольные работы; письменные отчеты по аудиторным (домашним) практическим упражнениям; письменные отчеты по лабораторным работам.

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «Математические основы квантовых вычислений» учебным планом предусмотрены зачет.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

Тема 2.1. Формализация понятия алгоритм

Студент решает конкретные вычислительные задачи на машине Тьюринга. Составляет алгоритмы в виде конкретной машины Тьюринга.

Форма контроля - собеседование.

Тема 3.1. Математическая модель системы кубитов

Знакомство по дополнительной литературе и интернет-источникам с современными экспериментами по квантовой запутанности. Знакомство с существующими моделями квантового компьютера. Подробное изучение математической модели кубита и системы кубитов и операций над ними.

Форма контроля - контрольная работа

Тема 4.4. Алгоритм Шора.

Знакомство по дополнительной литературе и интернет-источникам с алгоритмами криптографии, теряющими свою стойкость с появлением полноценного квантового компьютера. Знакомство с идеями и методами постквантовой криптографии. Знакомство с квантовыми протоколами передачи секретного ключа и их реализациями.

Форма контроля - собеседование.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется *метод учебной дискуссии*, который предполагает участие студентов в целенаправленном обмене мнениями, идеями для предъявления и согласования существующих позиций в определенной задаче.

Использование метода обеспечивает появление нового уровня понимания изучаемой темы, применение знаний при решении задач, определение способов их решения.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

При изучении учебной дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- поиск (подбор) и обзор литературы и электронных источников по изучаемой теме;
- выполнение домашнего задания;
- работы, предусматривающие решение задач и выполнение упражнений;
- изучение материала, вынесенного на самостоятельную проработку;
- подготовка к лабораторным занятиям;
- научно-исследовательские работы;
- анализ статистических и фактических материалов по заданной теме, проведение расчетов, составление схем и моделей на основе статистических материалов.

Примерный перечень заданий для контрольных работ

1. Посчитать сложность в среднем классического алгоритма быстрой сортировки.
2. Вычислить сложность в худшем случае классического алгоритма сортировки вставками.
3. Свести задачу минимизации обхода конкретного графа к задаче квадратичной неограниченной бинарной оптимизации, эффективно решаемой на адиабатическом квантовом компьютере.
4. Проверить несепарабельность конкретного состояния системы кубитов.
5. Вычислить произведение Кронекера матриц.
6. Реализовать конкретную функцию с помощью квантовой схемы.
7. По конкретной квантовой схеме восстановить функцию.
8. Вычислить квантовое преобразование Фурье конкретного n -кубитового состояния.

Примерный перечень вопросов к зачету

1. Математическая модель квантового бита. Сфера Блоха.
2. Математическая модель системы из нескольких битов. Тензорное произведение гильбертовых пространств.
3. Тензорное произведение операторов. Умножение Кронекера.
4. Описание однокубитовых унитарных операторов.
5. Управляемые квантовые вентили.
6. Вычислительный базис. Вероятностный смысл коэффициентов в вычислительном базисе.
7. Квантовые схемы.
8. Универсальные наборы квантовых элементов.
9. Алгоритм Дойча.
10. Алгоритм Дойча-Джозы.
11. Алгоритм Саймона.
12. Кодирование и декодирование фазы. Пример с преобразованием Адамара.
13. Задача Бернштейна-Вазирани.
14. Задача оценки квантовой фазы. Оператор поворота фазы.
15. Квантовое преобразование Фурье.
16. Нахождение периода периодического состояния.
17. Задача оценки собственного значения и алгоритм ее решения с помощью квантового преобразования Фурье.
18. Алгоритм Шора. Нахождение порядка по Шору.
19. Вычисление дискретного логарифма.
20. Алгоритм Гровера.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
1. Уравнения математической физики	Кафедра математической кибернетики	нет	Вносить изменения не требуется (протокол № 13 от 22.05.2023)
2. Вариационное исчисление	Кафедра функционального анализа и аналитической экономики	нет	Вносить изменения не требуется (протокол № 13 от 22.05.2023)
3. Численные методы	Кафедра веб-технологий и компьютерного моделирования	нет	Вносить изменения не требуется (протокол № 13 от 22.05.2023)

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ ПО
ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на ____/____ учебный год

№ п/п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
_____ (протокол № ____ от _____ 202_ г.)

Заведующий кафедрой

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета